

## 광 Pickup 용 Gradient-Index 대물렌즈 설계

박인규 · 이종웅<sup>†</sup>

청주대학교 레이저광정보공학과  
Ⓣ 360-764 충청북도 청주시 상당구 내덕동 36번지

(2007년 7월 25일 받음, 2007년 8월 17일 수정본 받음)

SELFOC 소재를 사용하여 높은 수치구경을 가지는 광픽업용 대물렌즈를 설계하였다. SELFOC 소재는 radial gradient-index 분포를 가지며, 이것은 설계에 추가적인 자유도를 제공하므로, 비구면이 아닌 구면만으로 높은 수치구경의 대물렌즈의 설계가 가능하다. 이 연구에서는 quadratic constant와 광축의 굴절률, 광축 두께, 입사동 직경을 변화시키며 rms 스폿 직경 변화를 조사하였으며, Code V를 사용하여 대물렌즈의 최적화와 결상특성을 평가하였다. 이 분석에서는 quadratic constant와 광축의 굴절률이 클수록, 렌즈가 두꺼워질수록, 입사동 직경은 작을수록 더 좋은 특성을 보임을 알 수 있었다. 이 결과를 바탕으로 2매의 구면 SELFOC 렌즈로 구성된 높은 NA의 DVR용 대물렌즈를 설계하였으며, 2가지 형태의 해 Solution I, II가 존재하였다. Solution I은 두 매 모두 양의 굴절능을 가지며 compact한 광학계를 구성하지만, 비축 수차 보정이 Solution II에 비해 부족하였다. Solution II는 음-양의 굴절능으로 조합된 광학계로 비축 수차가 비교적 잘 보정되었지만, 광학계의 전장길이가 길고 렌즈의 직경이 커지는 문제점이 있었다.

주제어 : Gradient-index lenses, Lens design, Optical data storage, Optical pick-up, SELFOC lens

### I 서 론

최근 IT 기술의 비약적인 발전으로 많은 양의 정보를 처리할 수 있게 되었으며 초고속 정보통신 인프라의 구축으로 대용량의 멀티미디어 정보 이용이 크게 증가하였다. 이에 따라 정보저장장치도 대용량화, 고속화 되고 있다. 광정보 저장장치<sup>[1-3]</sup>(ODD: optical disk drive)는 대용량의 정보를 손쉽게 빠르게 저장하여 이동할 수 있는 장점을 가지고 있어 널리 사용되고 있으며, 650 MB의 저장용량을 가지는 제 1세대 CD-ROM에서 4.7 GB의 저장용량을 가지는 제 2세대 DVD, 30 GB의 저장용량을 가지는 제 3세대 DVR로 발전하고 있다. 이에 따라 광정보 저장장치에서 핵심 기능을 수행하고 있는 광픽업의 대물렌즈도 점차 고성능화 되고 있으며, 파장 780 nm, NA 0.45의 CD-ROM용 대물렌즈에서 파장 650 nm, NA 0.6의 DVD용 대물렌즈를 거쳐 파장 405 nm, NA 0.85의 DVR용 대물렌즈(blue-ray 렌즈)가 개발되어 있다.

CD-ROM과 DVD용 대물렌즈에는 일반적으로 비구면 플라스틱 렌즈 1매가 사용되며, blue-ray에서는 1매 구성 대물렌즈 또는 2매 구성 대물렌즈가 사용되고 있다. 1매 구성 대물렌즈는 유리 비구면 렌즈가 사용되고 있으며,<sup>[4,5]</sup> 2매 구성 대물렌즈는 2매 모두 유리 비구면을 사용한 것,<sup>[6,7]</sup> 2매 모두 플라스틱 비구면을 사용한 것,<sup>[6]</sup> 평면유리에 회절광학 소자를 성형한 보정렌즈<sup>[8]</sup>와 비구면 렌즈를 사용하는 것<sup>[9]</sup> 등 여러 형태로 개발되고 있다. 일반적으로 1매 구성 대물렌즈는 2매 구성 대물렌즈에 비하여 소형 경량화가 가능하고 구조가 간단하여 정렬이 쉽다는 장점을 가지고 있으나, 반면에

작동거리(working distance, WD)가 짧고 제작이 까다롭다는 문제점을 가지고 있다. 2매 구성 대물렌즈는 설계의 자유도가 많아 수차보정에 유리하며 작동거리가 길고 개개의 렌즈 자체의 제작은 용이하지만, 단렌즈 구성에 비하여 광픽업의 무게와 부피가 커지고 두 렌즈 간에 정밀한 정렬이 요구되는 문제점이 있다.

Gradient-index(GRIN) 소재는 빛이 직선으로 전파하는 일반적인 균일한 매질들과는 달리 곡선 경로를 따라 전파하는 광학 소재이며, 재질내의 굴절률 분포에 따라 spherical gradient, axial gradient, radial gradient로 나뉘어 진다.<sup>[11,12]</sup> GRIN 소재는 굴절률 분포라는 추가적인 자유도를 가지고 있으므로 동일한 매수의 유리렌즈 보다 고성능의 광학계를 설계할 수 있는 가능성이 있다. 본 연구에서는 이를 이용하여 radial gradient 소재의 일종인 일본판초차(NSG: Nippon Sheet Glass)의 SELFOC 렌즈를 사용하여 구면만으로 DVR용 대물렌즈를 설계하는 연구를 수행하였다.

### II. Radial Gradient-Index 소재

GRIN 소재의 일반화된 굴절률 분포함수는 다음과 같은 굴절률 다항식으로 표현된다.

$$N(r, z) = \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{i=0}^{\infty} N_{ij} r^{2i} z^j \quad (1)$$

여기서,  $r$ 은 광선의 높이를 나타내는 radial 좌표,  $z$ 는 광축 좌표이고  $N_{ij}$ 은 굴절률 다항식의 계수를 나타낸다. 이 굴절률 다항식은 GRIN 소재의 수차를 계산하기 위하여 Sands에

<sup>†</sup> E-mail: julee@cju.ac.kr

의해 최초로 사용되었다.<sup>[10,13]</sup> 계수  $N_{ij}$ 은 파장에 따라 달라지며 일반적으로  $d$ -선( $0.5876 \mu\text{m}$ ),  $F$ -선( $0.4861 \mu\text{m}$ )과  $C$ -선( $0.6563 \mu\text{m}$ ) 세 파장의 계수가 사용된다. 굴절률 분산은 Abbe 수와 유사하게 분산상수  $V_{ij}$ 를 사용하여

$$V_{ij} = (N_{ij,d} - 1) / (N_{ij,F} - N_{ij,C}) \quad (2)$$

과 같이 정의한다. 일반 유리의 굴절률 분산은  $V_{00}$ 에 해당하여, 20과 90 사이의 값을 가진다. 그러나 GRIN 소재의 분산  $V_{ij}$ 는 음의 값과 양의 값, 또는 무한대의 값들을 가질 수 있다.

Radial gradient-index(Radial GRIN) 소재는 굴절률  $n$ 이 그림 1에서 보는 바와 같이, 광축으로부터 방사상 거리  $r$ 의 함수로 원주 대칭을 갖는 굴절률 분포를 가지는 소재이다.

Radial GRIN 소재의 굴절률 분포함수는 식 (1)에서 radial 좌표  $r$ 과 다항식 계수  $N_{10}$ 만을 갖게 되어

$$N(r) = N_{00} + N_{10}r^2 + N_{20}r^4 + \dots \quad (3)$$

로 전개된다.

Nippon Sheet Glass사에서 생산되는 SELFOC 소재는 radial GRIN의 일종이며, 굴절률 분포는 radial 좌표  $r$ 과 quadratic constant  $A$ 로 다음과 같이 표시되어 있다.

$$N(r) = N_0(1 - Ar^2/2 + h_4r^4 + h_6r^6 + \dots) \quad (4)$$

이것을 radial GRIN에 대한 식 (3)과 비교하면

$$N_{00} = N_0, \quad N_{10} = -N_0A/2 \quad (5)$$

가 된다.

(4) 식의 SELFOC 소재를 사용하는 두께  $t$ 의 평판 렌즈의 굴절능  $\phi$ 는

$$\phi = -N_0 \sqrt{A} \sin(\sqrt{A} t) \quad (6)$$

로 주어지며, 매질의 길이에 따라 굴절능은 양 또는 음, 또는 0이 될 수 있다.

그림 2(a)는 평판형 GRIN 렌즈를 보여주고 있고, 그림

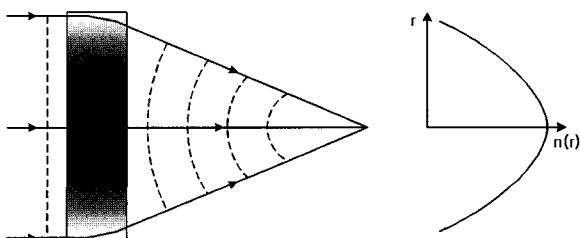


그림 1. Radial gradient-index 소재의 굴절률 분포.

2(b)는 평판 SELFOC 렌즈의 주기적인 결상과 반복 주기 (pitch)를 보여주고 있다. 평행광이 입사하여 첫 번째로 초점이 맺게 되는 길이는 1/4 pitch가 되며

$$P_{1/4} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{-N_{00}}{2N_{10}}} \quad (7)$$

로 주어진다.

렌즈의 두께가 얇다면 (7) 식에서 굴절능은

$$\phi \approx -N_0 A t \quad (8)$$

로 근사될 수 있다.

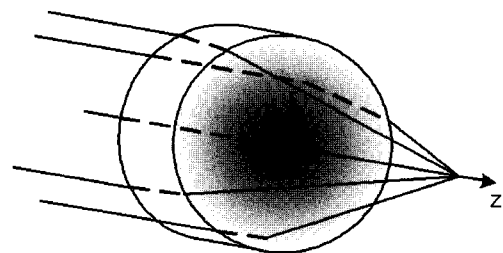
### III. Radial Gradient-Index 렌즈의 특성 분석

Nippon Sheet Glass사의 SELFOC 소재의 굴절률 분포는

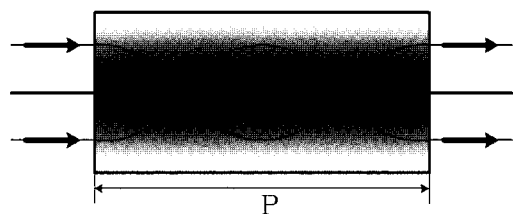
$$n(r) = n_0 \left\{ 1 - \frac{(\sqrt{A} \times r)^2}{2} \right\} \quad (9)$$

로 주어지고 있다. 여기서  $n_0$ 는 광축의 굴절률,  $A$ 는 quadratic constant이다.

이 연구에서는 SELFOC 대물렌즈의 수차특성을 파악하기 위하여 주어진 NA에서 입사동의 직경  $\phi_E$ , 렌즈의 두께  $t$ , quadratic constant  $A$ , 광축에서의 굴절률  $n_0$ 를 변화시키면서 앞면과 뒷면의 곡률반경  $r_1, r_2$ 을 변수로 스폿의 rms 직경을 비교하였다.



(a) 평판형 radial GRIN 렌즈



(b) Radial GRIN 렌즈의 pitch(P)

그림 2. Radial gradient-index 렌즈.

표 1. Radial gradient-index 렌즈의 특성 분석을 위한 시험설계조건

수치구경	광축의 굴절률 $n_0$	Quadratic Constant $A$	입사동 직경 $\phi_E$	렌즈두께 $t$
0.45	1.60~1.68 (0.02씩 증가)	0.15~0.60 (0.15씩 증가)	1.0~3.0 mm (0.5 mm씩 증가)	1.0~1.8 mm (0.2 mm씩 증가)
0.60				
0.85				

최적화에는 Code V를 이용하였고, 1매의 구면 렌즈에서 곡률만을 변수로 사용하였으며, 수치구경(numerical aperture) 0.45, 0.60, 0.85에 대해 최적화하고 스폿의 rms 직경을 비교하였다. 표 1에는 각 설계 요소별로 시험설계에 사용된 조사 범위가 정리되어 있다.

3.1 Quadratic Constant와 광축의 굴절률에 따른 비교

그림 3은 렌즈의 두께  $t$ 를 1.0 mm로 선정하고, quadratic constant  $A$ 와 광축의 굴절률  $n_0$ 를 바꾸어가면서 수치구경이 0.45인 대물렌즈를 설계하여 스폿의 rms 직경을 비교한 그림이다. 그림 3(a)~(e)에서 우측상단에 있는 상자의 명암과 숫자는 스폿의 rms 직경(mm 단위)을 나타내고 있다. 이 그림에서 광축의 굴절률이 증가하고 quadratic constant가 증가할수록 스폿의 직경이 작아지는 것을 볼 수 있고, 광축의 굴절률보다는 quadratic constant에 더 민감하다는 것을 알 수 있다.

수치구경 0.60, 0.85인 경우도 동일한 경향을 나타내고 있으므로, 이 두 경우에 대한 그림은 별도로 제시하지 않았다. 그림 3의 (d), (e)에서 하얀 점선영역은 NA가 0.45보다 커

진 경우를 표시하고 있다. 이것은 평판 SELFOC 렌즈의 굴절능을 표현하는 (8) 식에서 그 이유를 설명할 수 있다. 평판 SELFOC 렌즈의 경우 두께  $t$ 가 고정되면  $n_0$ 와  $A$ 에 의하여 굴절능이 주어진다. 그림 3(d)와 (e)에서  $NA > 0.45$ 인 영역은  $n_0$ 와  $A$ 가 커서 평판 렌즈 자체의 굴절능이 매우 커지며 면의 곡률을 사용하여 굴절능을 강제로 유지시키면 수차보정이 불가능해지는 문제점이 있어 NA를 제한하지 않았다.

광축의 굴절률  $n_0$ 와 quadratic constant  $A$ 가 증가할수록 렌즈의 곡률반경이 커지며, 유효 초점거리 및 후초점거리는 짧아진다. 이것은 균일한 매질에서 굴절능이 렌즈의 곡률에만 의존하는 것과는 달리 GRIN 렌즈에서는 quadratic constant가 굴절능에 기여해 곡률에 대한 의존성이 상대적으로 적기 때문으로 이해된다.

3.2 Quadratic Constant와 렌즈 두께에 따른 비교

그림 4는 광축의 굴절률  $n_0$ 가 클수록 스폿의 직경이 작아진다는 그림 3 결과를 참조하여  $n_0 = 1.68$ 로 고정하고, quadratic constant  $A$ 와 렌즈의 두께  $t$ 를 변화시키며 NA 0.45의 렌즈를

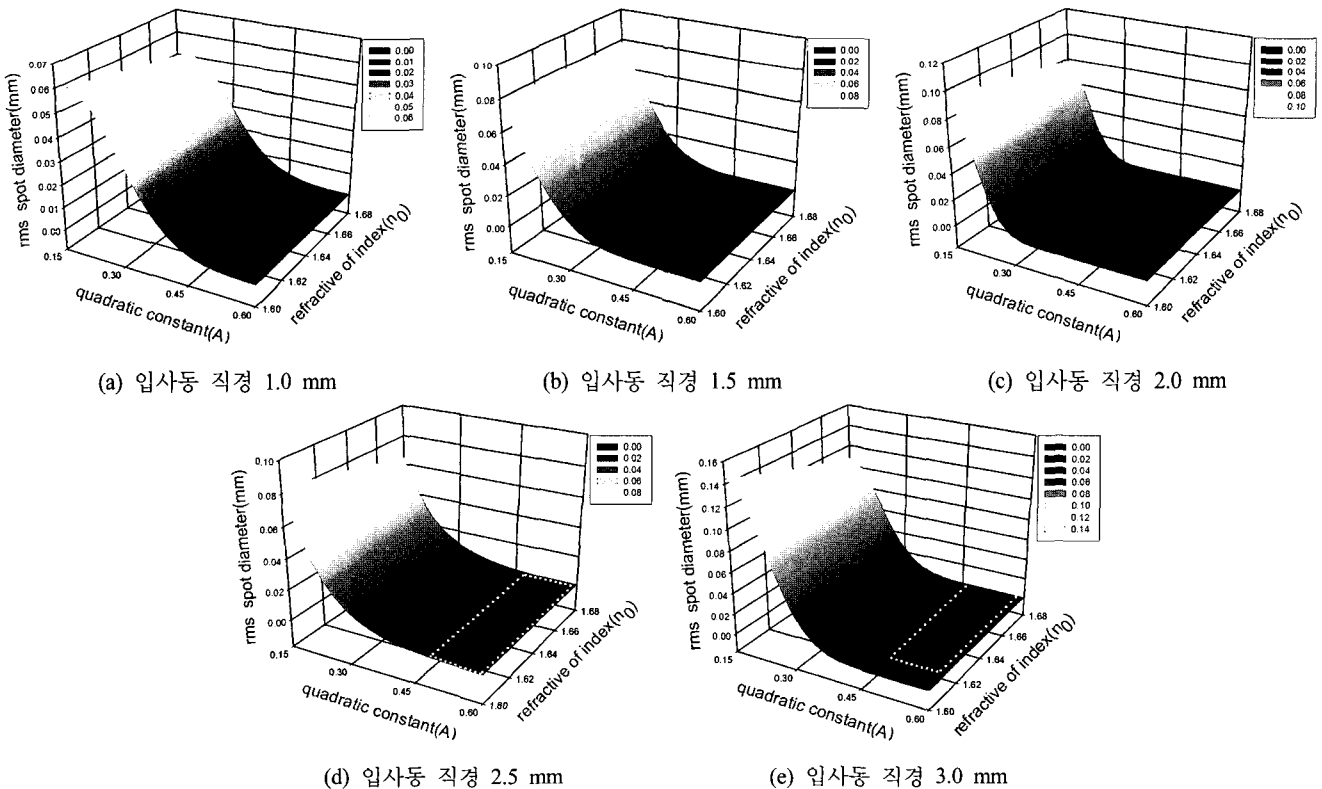


그림 3. Quadratic constant  $A$ 와 광축의 굴절률  $n_0$ 에 따른 스폿의 rms 직경 변화(NA=0.45, 렌즈 두께  $t = 1.0$  mm).

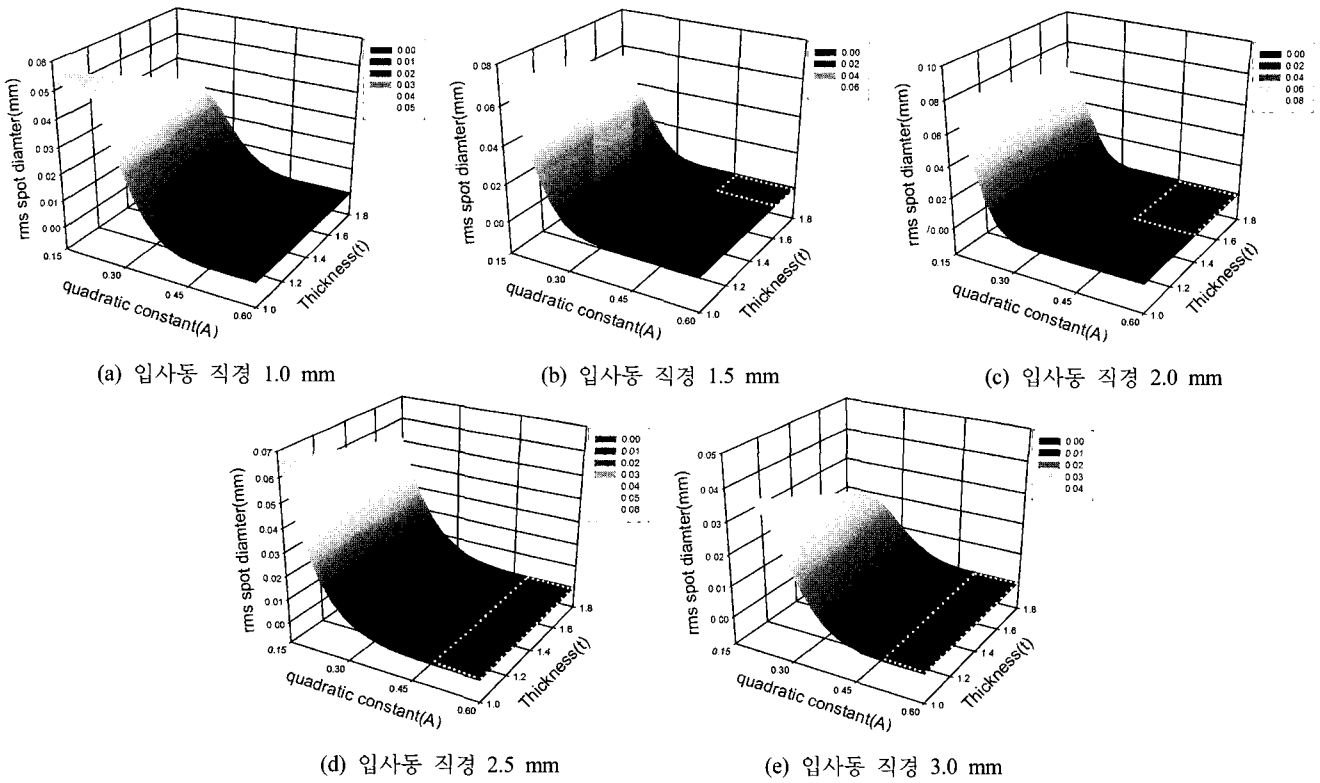


그림 4. Quadratic constant  $A$ 와 렌즈 두께  $t$ 에 따른 스폿의 rms 직경 변화( $NA=0.45$ , 광축의 굴절률  $n_0=1.68$ ).

설계하고 스폿의 rms 직경을 비교한 그림이다. 이 그림을 보면 quadratic constant  $A$ 가 증가하고 렌즈의 두께  $t$ 가 두꺼워질수록 스폿의 직경은 작아지는 것을 볼 수 있다. 수치구경과 입사동 직경이 더 큰 경우에도 같은 경향을 보여주고 있었다.

유효 초점거리 및 후초점거리 또한 렌즈의 두께가 두꺼워질수록 짧아지는 경향을 가졌고, 렌즈의 곡률반경이 커지는 결과를 볼 수 있었다. 이는 앞서 언급한 바와 같이, 렌즈 두께가 두꺼워지면서 quadratic constant에 의한 광선의 광경로 변화가 더 커지게 되어 곡률에 대한 의존성이 완화되는 것으로 해석된다. 그림 4의 (b), (c), (d), 그리고 (e)에 표시된 하얀 점선은  $NA 0.45$  이상의 값을 가지는 영역을 표시하고 있다.

### 3.3 Quadratic Constant와 입사동 직경에 따른 비교

그림 5는 광축의 굴절률이 높을수록, 렌즈의 두께가 두꺼울수록 스폿의 직경이 작아진다는 결과를 바탕으로  $n_0=1.68$ ,  $t=1.8$  mm로 고정하고,  $NA 0.45, 0.60, 0.85$  각각에 대해 quadratic constant  $A$ 와 입사동 직경을 변화시키면서 최적화한 대물렌즈의 스폿의 rms 직경을 비교한 그림이다.

이 그림을 보면 개개의 수치구경에 대해서는 입사동의 직경이 커질수록 스폿의 직경도 커지는 것을 볼 수 있다.  $NA$ 가  $0.85$ 인 경우에 입사동의 직경이  $2.5$  mm 이상이 되면 1배의 렌즈로 설계가 불가능 하였다.

이상의 결과를 본다면 입사동의 직경이 커질수록 스폿의 직경도 커지고 있음을 알 수 있다.

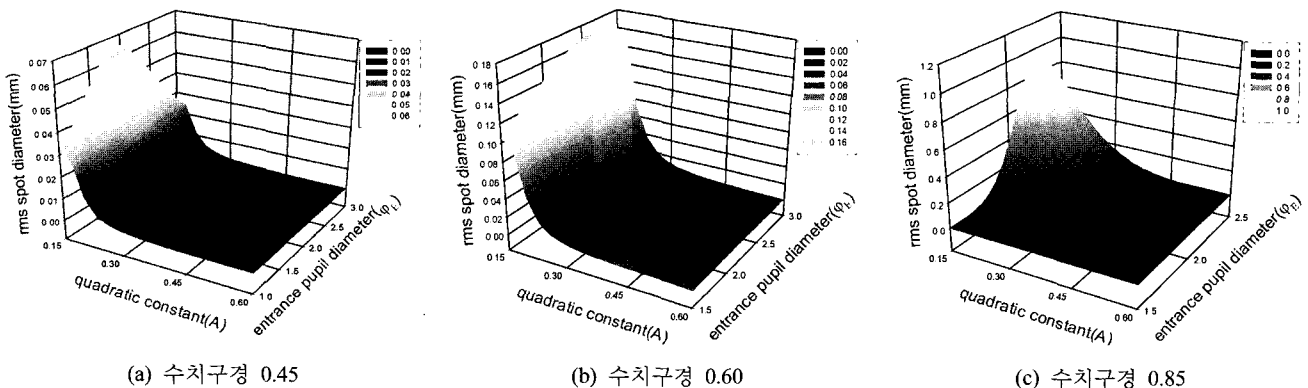


그림 5. Quadratic constant  $A$ 와 입사동 직경  $\phi_p$ 에 따른 스폿의 rms 직경 변화(광축의 굴절률  $n_0=1.68$ , 렌즈 두께  $t=1.8$  mm).

### IV. Radial Gradient-Index 소재를 이용한 DVR용 Objective Lens의 설계

#### 4.1 DVR용 Gradient-Index 대물렌즈의 설계조건 및 사양

DVR용 대물렌즈는 blu-ray과장인 405 nm를 사용하고 있고 수치구경 0.85, 작동거리는 0.1 mm 이상을 요구하고 있다. 앞에서의 분석 결과에 따르면 높은 수치구경을 필요로 하는 DVR용 대물렌즈를 설계하기 위해서는 그에 상응하여 quadratic constant  $A$ 가 큰 SELFOC 소재가 선택되어야 한다. 그러나 quadratic constant  $A$ 가 큰 SELFOC 소재는 직경에 제한이 있으므로, 이를 고려하여 입사동의 직경을 선정하였다.

DVR용 대물렌즈는 높은 수치구경으로 인해 1매의 소재로

표 2. DVR용 대물렌즈의 설계사양

Design parameter	Solution I	Solution II
Numerical Aperture(NA)	0.85	0.85
Diameter of Entrance pupil(EPD)	1.3 mm	1.0 mm
Wave length	405 nm	405 nm
Effective Focal Length(EFL)	0.762 mm	0.567 mm
Working Distance(WD)	0.1 mm	0.1 mm
Over All Length(OAL)	1.4 mm	4.6 mm
Field Angle	1.2°	1.2°

표 3. DVR용 대물렌즈의 재질

Material	Solution I	Solution II
Lens Material	SLW3.0 ( $n_0 = 1.6075, \sqrt{A} = 0.206$ )	SLH1.8 ( $n_0 = 1.6576, \sqrt{A} = 0.428$ )
	SLH1.8 ( $n_0 = 1.6576, \sqrt{A} = 0.428$ )	SLH1.8 ( $n_0 = 1.6576, \sqrt{A} = 0.428$ )
	@ 630 nm	@ 630 nm
Substrate	polycarbonate( $n_d = 1.585$ , 분산상수 30 @ 587 nm)	

는 한계가 있어 2매로 구성되는 광학계로 설계하였다.

SELFOC을 이용한 DVR용 대물렌즈의 설계에서는 2종류의 해가 존재하였고, 그 중 첫 번째 렌즈의 앞면이 볼록인 meniscus로 구성된 형태를 I형, 첫 번째 렌즈의 앞면이 오목인 meniscus로 구성된 형태를 II형으로 명명하였다. I형의 해의 예로는 그림 6의 Solution I이 있고, 이 형태의 해는 두 매 모두 양의 굴절능을 가지며 compact한 광학계를 구성한다. II형의 해의 예로는 그림 6의 Solution II로, 이 형태의 해는 retro-focussing lens 형태로 I형에 비해 광학계 전장길이가 긴 특징이 있다. 표 2는 I형과 II형 각각에 해당하는 Solution I, II에 대한 설계 사양을 나타내고 있으며, 설계에 사용된 재질은 표 3에 나타내었다. 표 4에는 Solution I, II에 대한 설계제원이 나타나 있다.

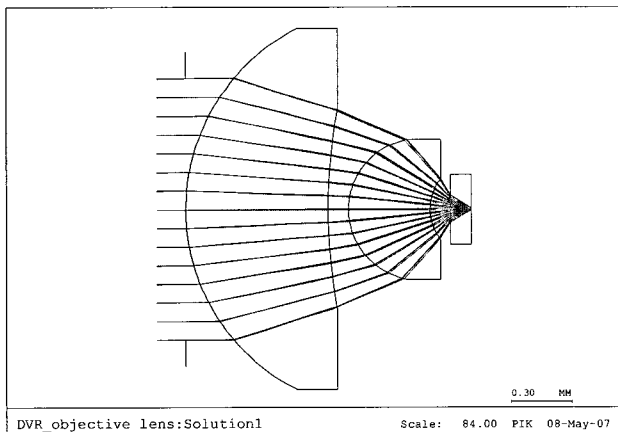
표 4. DVR용 대물렌즈의 설계제원

#### (a) Solution I

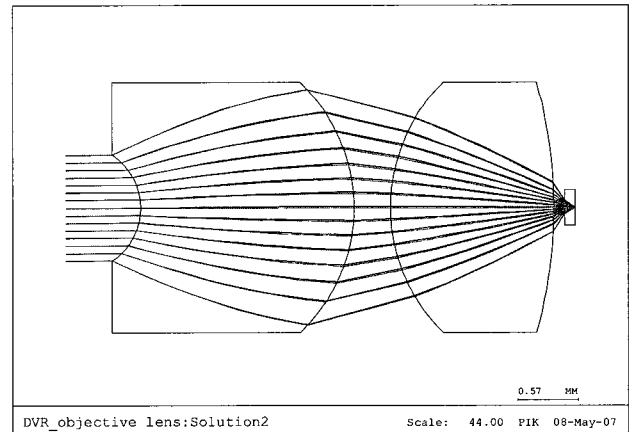
Surface	Radius	Thickness	Material
STOP	infinity	0.000	
2	1.004	0.700	SLW30_NSG
3	2.760	0.100	
4	0.353	0.401	SLW18_NSG
5	0.250	0.100	
6	infinity	0.100	PC

#### (b) Solution II

Surface	Radius	Thickness	Material
STOP	infinity	0.000	
2	-0.605	2.000	SLH18_NSG
3	-1.645	0.343	
4	1.673	1.529	SLH18_NSG
5	-4.445	0.100	
6	infinity	0.100	PC

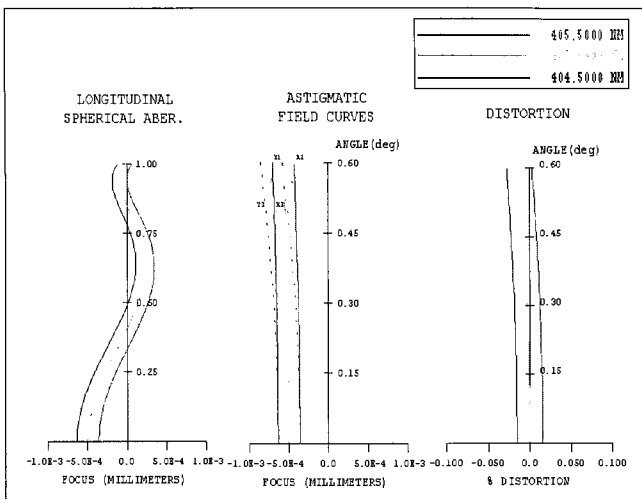


(a) Solution I

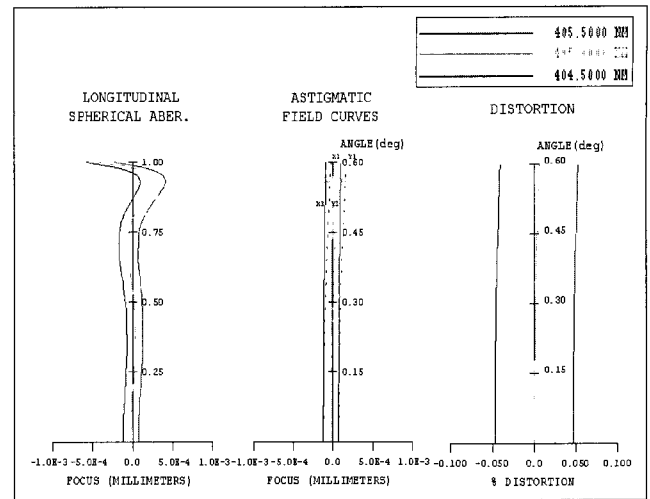


(b) Solution II

그림 6. 설계된 DVR용 대물렌즈계의 형태.

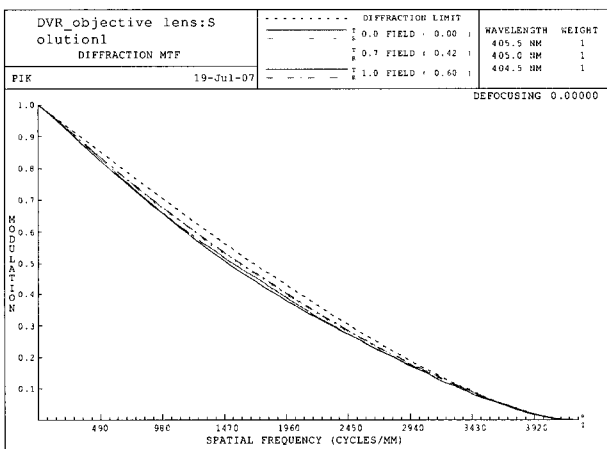


(a) Solution I

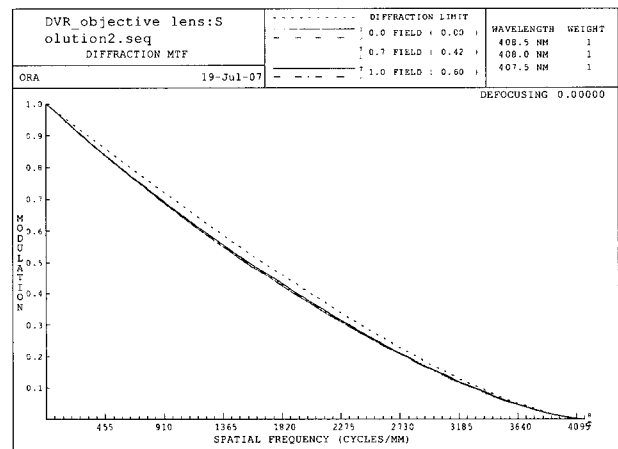


(b) Solution II

그림 7. DVR용 대물렌즈의 유한광선수차.



(a) Solution I



(b) Solution II

그림 8. DVR용 대물렌즈의 modulation transfer function(MTF).

### 4.2 수차분석

설계한 DVR용 gradient-index 대물렌즈 Solution I, II 각각에 대한 유한광선 수차는 그림 7, modulation transfer function (MTF)은 그림 8, spot diagram은 그림 9, 파면수차 및 strehl ratio는 표 5에 나타나 있다.

유한광선수차를 살펴보면 Solution I에는 defocus가 존재하며, Solution II는 파장에 따른 왜곡수차가 Solution I에 비해 비교적 큰 편임을 알 수 있다.

Spot diagram은 Solution I, II 모두 비축상점에서 코마수차가 존재하지만, Solution II가 Solution I에 비해 스폿의 rms 직경이 더 작은 것을 볼 수 있다. Modulation transfer function (MTF)과 rms wavefront error에서도 Solution I, II 모두 비축상의 수차보정이 떨어지는 것을 알 수 있다.

Solution I, II 모두 회절한계 이하의 수차특성을 가지고 있지만, 비구면 렌즈로 구성된 DVR용 렌즈와 비교하여 비축

표 5. DVR용 대물렌즈의 rms wavefront error

(a) Solution I

Field Angle	0.00	0.21	0.60	회절한계
RMS Spot	0.24 $\mu\text{m}$	0.34 $\mu\text{m}$	0.43 $\mu\text{m}$	$\leq 0.58 \mu\text{m}$
RMS(waves)	0.044 $\lambda$	0.038 $\lambda$	0.047 $\lambda$	$\leq 0.07 \lambda$
Strehl Ratio	0.928	0.945	0.917	$\geq 0.8$

(b) Solution II

Field Angle	0.00	0.21	0.60	회절한계
RMS Spot	0.14 $\mu\text{m}$	0.26 $\mu\text{m}$	0.32 $\mu\text{m}$	$\leq 0.58 \mu\text{m}$
RMS(waves)	0.022 $\lambda$	0.038 $\lambda$	0.048 $\lambda$	$\leq 0.07 \lambda$
Strehl Ratio	0.982	0.945	0.914	$\geq 0.8$

수차의 보정이 약간 부족하여 두 가지 solution 모두 시계각의 제한이 생긴다는 문제점을 가지고 있다.

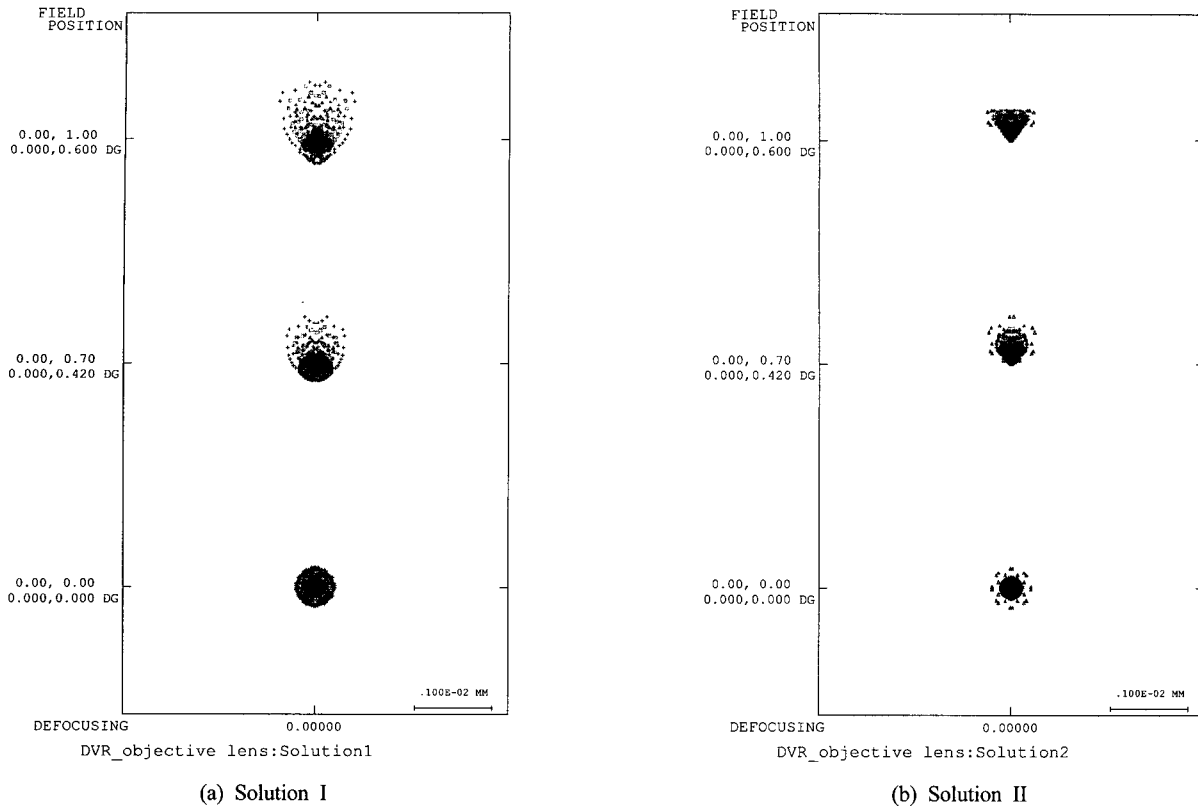


그림 9. DVR용 대물렌즈의 spot diagram.

### V. 결 론

본 연구에서는 gradient-index material 중에서 radial gradient의 한 종류인 SELFOC 소재를 사용하여 2매의 구면렌즈로 구성된 DVR용 NA 0.85의 대물렌즈를 설계하였다.

이 렌즈의 설계에 앞서 Code V를 사용하여 굴절능에 기여하는 quadratic constant, 광축의 굴절률, 렌즈의 두께, 입사동의 직경을 변화시키며 렌즈의 곡률만을 변수로 최적화하여 rms 스폿 직경을 계산하여 각 조합의 특성을 비교 분석하였다. 이 분석에서 quadratic constant와 광축의 굴절률이 크고, 렌즈 두께가 두껍고, 입사동 직경이 작을수록 rms 스폿 직경이 작아지는 것을 확인할 수 있었다.

DVR용 GRIN 대물렌즈의 설계에서는 앞의 분석 결과를 바탕으로 quadratic constant가 높은 소재를 사용하였으며, 구경에 비하여 두꺼운 렌즈로 설계하였다. DVR용 대물렌즈는 2매의 SELFOC 구면렌즈로 구성되었고, 2가지 형태의 해 Solution I, II가 존재함을 알 수 있었다. Solution I은 광학계의 전장이 Solution II에 비해 짧은 반면, 비축수차보정이 약간 떨어진다. 두 solution 모두 축상에서는 회절한계 이하의 수차특성을 가지고는 있지만, 약간의 비축수차가 존재하여 광학계의 시계각이 제한된다는 문제점을 가지고 있다.

본 연구에서 SELFOC 렌즈를 소재로 하여 구면만으로 구성된 DVR용 대물렌즈를 설계해본 결과, 비축수차의 보정이 부족하여 보다 엄밀한 정렬이 요구되기는 하지만, 축상의 결

상 특성으로 본다면 높은 NA의 대물렌즈 설계가 가능함을 확인할 수 있었다.

### 참고문헌

- [1] 백문철, 강광용, “포터블 광 저장기술의 동향분석”, *전자통신동향분석*, 제20권 제6호, pp. 36-47, 2005.
- [2] 이철우, “삼성전자의 DVD(Digital Versatile Disc)용 광 픽업의 현황”, *광학과 기술*, pp. 17-22, 1997.
- [3] 나노기술분석보고서 “Blue laser를 이용한 차세대 정보 저장장치”, *NANO WEEKLY*, 192호, pp. 2-5, 2006.
- [4] K. Maruyama, T. Shimano, and T. Aryoshi, “High NA aspherical single lens for next generation optical disc system(Japanese),” *제27회 광학 symposium*, pp. 51-54, 2002.
- [5] M. Itonaga *et al.*, “Investigation of general design principle of single lens and development of new NA=0.85 single lens,” *IEEE Proc.*, pp. 383-385, 2002.
- [6] 이종용, “SMPH 광픽업용 렌즈 설계”, *한국전자통신연구원*, 2005.
- [7] K. Takada, H. Hatano, J. Hashimura, N. Mushiake, and H. Ueda, “Objective lens for blue laser optical pickup with numerical aperture of 0.9,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 41, pp. 1838-1839, 2002.
- [8] B. H. W Hendriks, M. Kuijper, J. M. tr Meullen, J. J.

- H. B. Schleipen, and J. E. de Vries, "High NA achromatic objective lens," *IEEE Proc.*, pp. 395-397, 2002.
- [9] 박영필 외 4, "차세대 정보장치의 최신 기술 동향", *정보저장시스템학회 논문집*, 제1권 제1호, pp. 1-22, 2005.
- [10] Duncan T. Moore, *HandBook of optics II* (McGraw-Hill Inc., United States of America, 1995), Chap. 9.
- [11] Erich W. Marchand, *Gradient Index Optics* (Academic Press, New York, 1978)
- [12] Duncan T. Moore, "Gradient-index optics: a review," *Appl. Opt.*, vol. 19, no 7, pp. 1035-1038, 1980.
- [13] P. J. Sands, "Third-order Aberrations of Inhomogeneous Lenses," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 60, no 1, pp. 1-7, 1970.

### Optical Design of Gradient-Index Objective for Optical Pickup

In-Kyu Park and Jong Ung Lee<sup>†</sup>

*Department of Laser and Optical Information Engineering, Cheongju University, Cheongju 360-764, Korea*

<sup>†</sup>*E-mail: julee@cju.ac.kr*

(Received July 25, 2007, Revised manuscript August 17, 2007)

High NA objective design by using SELFOC materials was studied, and two kinds of objective for optical pick-up were designed. The SELFOC materials have radial gradient index distribution, and it gives additional degree of freedom in optical design. Therefore, we expect that optical design of high NA objective without aspheric surface will be possible.

In this study, the variation of rms spot diameter was investigated as a function of quadratic constant and refractive index on axis for various combinations of axial thickness and entrance pupil diameter. For the survey, Code V was used for optimization and evaluation of the objective lenses. The result suggested that larger quadratic constant and higher refractive index on axis could give us better imaging performance for all combinations of axial thickness and pupil diameter.

Based on the survey, we designed high NA objectives for DVR. There were two kinds of design solution consisting two spherical SELFOC lenses. The solution I had positive-positive lens configuration with short over-all-length, but it had poor off-axial performance compared with the solution II. The solution II had negative-positive lens configuration with good off-axial imaging performance. But the solution II had some disadvantages, long over-all-length and large diameter of the second lens.

OCIS code : 110.2760, 080.3620, 210.0210.